

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03487

研究課題名（和文）電場ベクトル制御技術を駆使した超高速スピン輸送制御

研究課題名（英文）High speed spin transport control with vector-field pulse shaping

研究代表者

伊藤 宙陸（Ito, Hironori）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・特任助教

研究者番号：60724127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究グループの独自の波形整形技術を用いて光の持つ物理量である偏光方向、周波数、位相を操作し、伝導電子のスピン、電子速度、局所電子濃度の制御に直結させる究極的な光-キャリア制御を目指した。まず半導体量子井戸を低温にて光照射と伝導測定が可能な計測システムを構築した。波形整形によって偏光方向がテラヘルツ周波数で回転するねじれ偏光パルスを生成し、半導体量子井戸に照射した。その結果、光の持つ角運動量が伝導電子にスピンの転写され、光電圧信号からスピン流を観察することに成功した。さらに最終的な目標であるトポロジカル絶縁体試料のスピン流の観測を目指し国際共同研究にてテラヘルツポンプロープ光学系を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー光の持つ波形をフェムト秒単位で正確に制御する技術を駆使し、半導体中の電子の持つスピンを操作する新たな方法を発見した。さらに電子の持つスピンの応じてその運動を光で操作することに成功した。この方法は電子の位置や運動方向およびスピンまで電子の持つ全ての物理的自由度を制御できるため、光の新たな活用法として広く応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The polarization, frequency, and phase, which are physical quantities of light, were manipulated using the original pulse shaping of this research group. We tried optical-carrier control that is directly connect to the conduction electron spin, electron velocity, and local electron concentration. First, we constructed a measurement system that enables light irradiation and transport measurement of semiconductor quantum wells at low temperatures. The pulse shaping generated a polarization-twisted pulse whose polarization rotates at a terahertz frequency, and irradiated the semiconductor quantum well. As a result, the angular momentum of light was transferred to the spin of conduction electrons, and we succeeded in observing the spin current from the photovoltage signal. Furthermore, we developed a terahertz pump probe system through international joint research to observe the spin current of topological insulator.

研究分野：光物性

キーワード：フェムト秒レーザー 光位相制御 偏光制御 半導体 トポロジカル絶縁体 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

半導体量子井戸やトポロジカル絶縁体は2次元平面に分布する電子系であり、その伝導特性は伝導電子のスピンの大きさによって大きく左右される。電子スピンは基本的な物理量であり電子の持つ情報量を増やす等、活用が期待されているが瞬時に局所的に制御するには静磁場だけでなく光による制御が求められている。

トポロジカル絶縁体の表面バンドや半導体量子井戸の伝導帯サブバンド間に光を用いて直接アクセスしスピン偏極した伝導電子の流れであるスピン流を生成させるためには、エネルギーの低いTHz周波数領域に共鳴させる必要がある。しかしこれまでTHz領域において、偏光方向、周波数、位相を制御し任意の電場ベクトルを生成するための技術がなく、特にトポロジカル絶縁体においては直接的なスピン流の生成は確認されていない。研究代表者のグループはこれまでに実現されなかったテラヘルツ周波数領域にアクセス可能な電場ベクトル波形整形技術を開発しておりこの技術を駆逐することで伝導電子のスピン流の生成と観測が期待される。

2. 研究の目的

本研究課題は光の持つ物理量である a 偏光方向制御、b 周波数制御、c 位相制御、全てを駆逐することで、伝導電子の A スピン、B 電子速度、C 局所電子濃度に直結させるという、究極的な光-キャリア制御を目指す試みである。その過程で解明される物理現象は今後の電子物性科学にとって大きな知見となる。まず半導体量子井戸において低温にて光照射と伝導測定が可能な計測システムを構築し、電場ベクトル波形整形のパラメーターを最適化してスピン流を観測することを目的とする。その後トポロジカル絶縁体におけるスピン流の生成と観察のためにテラヘルツパルスへの拡張と試料の開発を実施する。

3. 研究の方法

(1) レーザーパルスの電場ベクトル波形整形と計測システムの構築

量子井戸試料におけるスピン流の生成と観測を可能にするシステムを構築した。図1に示すように光源は波長帯域700-900 nm、パルス幅が20 fs のフェムト秒チタンサファイアレーザーを使用し、レーザーパルスは4f系に導入される。フーリエ面に設置された2枚の空間位相変調機によって進行方向と直行する電場の45度成分と-45度成分はそれぞれ独立に位相が制御され、成分ごとにレーザーパルスの分散と遅延が調整される。その後、光弾性変調器によって片方の成分

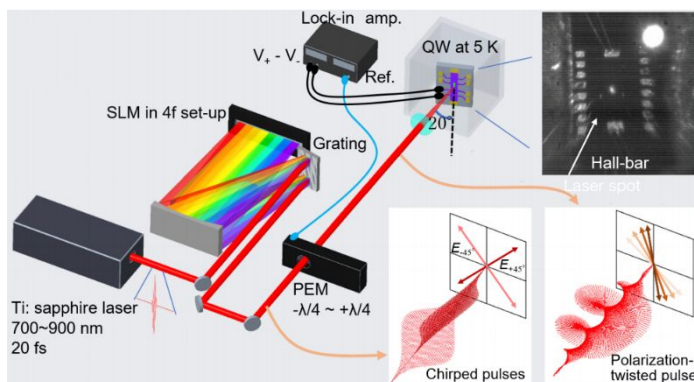


図1 レーザーパルスの電場波形整形機と計測システム

に1/4波長の遅延が加えられ、結果として図1の右下挿絵にあるような偏光方向がTHz周波数で回転するねじれ偏光パルスとなる。このねじれ偏光パルスの偏光回転周波数は0.1-50 THzまで任意に調整することができ、サブバンド間のエネルギーに共鳴させることができる。偏光回転方向は光弾性変調器によって50 kHzに変調され、5 Kの温度の試料に照射される。その変調に同期した試料の光電圧を複数のアンプで検出しスピン流を検出するシステムとなっている。

(2) 半導体量子井戸試料とスピン流の観察方法

試料は図2に示すようにGaAs/AlGaAsの量子

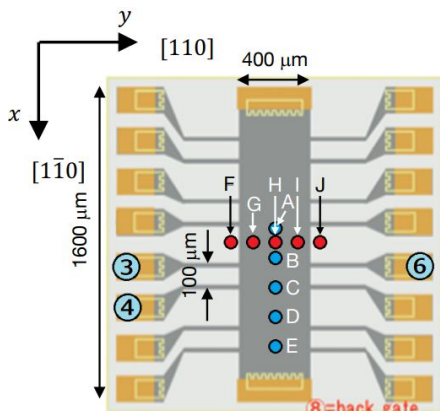


図2 試料構造と照射位置

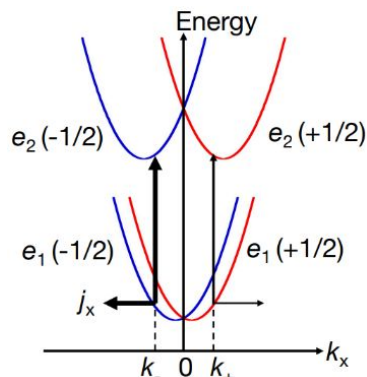


図3 試料のサブバンド構造

井戸を基板としたホールバー構造を作製した。光励起によって発生した電流は電極間の電圧として検出される。この試料の伝導帯のサブバンド構造を図3に示す。第1 (e_1) および第2 (e_2) サブバンドはスピン軌道相互作用によって運動量方向に分裂している。第1よりも第2サブバンドの分裂幅が大きい状況である。この実験においては波形整形技術で生成したねじれ偏向パルスによって角運動量がキャリアに転写されるか否かが焦点となる。仮に右回りねじれパルスによるラマン過程によって角運動量が転写された場合、図3の太い矢印による遷移が支配的となり結果として試料縦方向の電流 j_x が発生する。従って、光弾性変調器によって偏光回転方向を変調し発生する電流の符号の反転を確認することで、光からキャリアへの角運動量の転写が成されスピンの発生したか否か判断することができる試料設計となっている。

4. 研究成果

(1) 非共鳴条件におけるねじれ偏向パルス照射電圧の観測

図2のB地点にねじれ偏光パルスを照射し電極間に発生する光起電圧を観測した。ねじれ方向のみを変調し、右回りねじれパルスと左回りねじれパルス照射における光起電圧の差を V_{34} として、偏光回転周波数の関数として図4にプロットした。照射するねじれ偏向パルスの元となるレーザーパルスの波長域は量子井戸のGaAsのバンドギャップよりも長く設定し、直接励起によるキャリアの発生が生じない条件下にて V_{34} の観測を実施した。結果としてねじれ偏向パルスの偏光回転周波数の増大に伴い V_{34} が上昇し、さらにねじれ回転方向の反転で V_{34} の符号が反転することが確認された。この実験事実はねじれ偏向パルスによるラマン過程を経てスピンの発生した事を示唆している。

(2) 共鳴条件におけるねじれ偏向パルス照射電圧の観測

光源の波長域を広げバンドギャップを超えるエネルギーも含んだ条件において、上記と同様に V_{34} を測定した。共鳴条件においても同様にねじれ偏向パルスの回転方向で符号が反転する V_{34} が確認され、さらに最大で4桁ほどの V_{34} の上昇が確認された。この波長域においては価電子帯の実準位を介した共鳴ラマンを含むことになり、遷移確率の上昇に伴い V_{34} が増大したと考えられる。照射位置を図2のA-E地点へ移動しながら V_{34} を測定したところ測定に使用した電極にて最大の V_{34} が得られ、そこから離れるほどに減少していくことが確認された。これはねじれ偏光パルスによって生成したスピン流が2次元電子系試料内に広がり緩和していく様子を反映していると考えられる。

以上のように光の位相制御を駆使することでレーザーパルスの偏光状態を制御し、その光の持つ角運動量を伝導電子に転写することに成功し、光科学と電子輸送を結びつける重要な結果が得られた。[1]

(3) 今後の発展に向けた取り組み

最終的な目標であるトポロジカル絶縁体試料における表面状態スピンの観察に向けて、試料開発とレーザーパルスの波形整形技術の開発を相乗効果的に発展させるため、台湾交通大学と台湾成功大学と共同研究関係を築き、国際共同研究強化Aとして課題を引き継いだ。トポロジカル絶縁体試料のスピンの生成観察を想定し、テラヘルツパルスをダブルパルス化するためのねじれ偏向パルスの波形整形機構を台湾交通大学と共同で開発した。[2]この機構により生成されたねじれ偏向パルスは偏光回転方向、偏光回転周波数、パルス時間間隔が2つのパルスで独立に設定することが可能であるため、トポロジカル絶縁体試料内でスピンの緩和していく様子が時間を追って観察することが可能となる。

引用文献

- [1] H. Ito, T. Nakano, S. Nomura and K. Misawa, *Optics express* **27**, 28091 (2019).
 [2] H. K. Wei, H. Ito, K. Misawa and C. W. Luo, *Optics Letters* **45**, 6663 (2020).

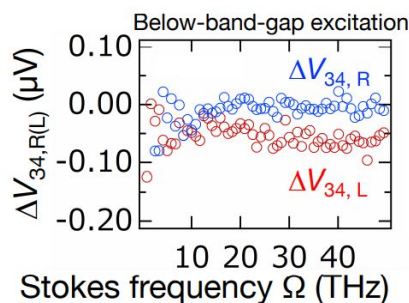


図4 非共鳴条件でねじれ偏向パルスを照射した際に発生する光電圧

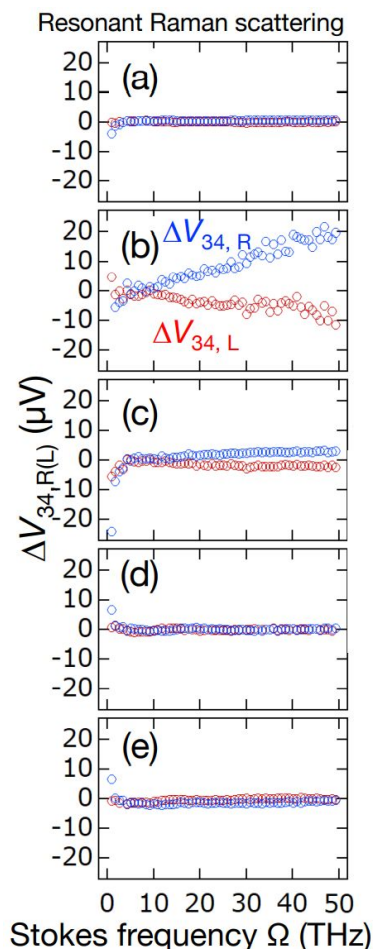


図5 共鳴条件でねじれ偏向パルスを照射した際に発生する光電圧

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ito Hironori, Nakano Tetsuo, Nomura Shintaro, Misawa Kazuhiko	4. 巻 27
2. 論文標題 Polarization envelope helicity dependent photovoltage in GaAs/Al _{0.3} Ga _{0.7} As modulation-doped quantum well	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 28091 ~ 28091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.028091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wei Hao-Keng, Ito Hironori, Misawa Kazuhiko, Luo Chih-Wei	4. 巻 45
2. 論文標題 Generation and manipulation of polarization-twisting dual pulses with a high degree of freedom	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 6663 ~ 6663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/ol.409672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hao-Keng Wei, Leona Isogai, Hironori Ito, Kazuhiko Misawa and Chih-Wei Luo
2. 発表標題 Twisted double-pulse generation via Michelson interferometer
3. 学会等名 Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hironori Ito, Tetsuo Nakano, Shintaro Nomura and Kazuhiko Misawa
2. 発表標題 Polarization envelope helicity dependent photocurrents in GaAs/AlGaAs modulation-doped quantum well
3. 学会等名 Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ito, T. Nakano, S. Nomura and K. Misawa
2. 発表標題 Polarization envelope helicity dependent photocurrents in GaAs/AlGaAs modulation-doped quantum well
3. 学会等名 International Conference on the Physics of Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三沢 和彦 (Misawa Kazuhiko) (80251396)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
その他の国・地域 台湾	台湾国立交通大学	台湾国立成功大学	